

ESTUDIO PRELIMINAR Y AJUSTE MATEMÁTICO DE LA REDUCCIÓN DE
CARGA ORGÁNICA EXPRESADA COMO DQO EN UN SISTEMA DE
TRATAMIENTO AEROBIO REALIZADO EN LA PTAR - RÍO FRÍO DE EMPAS
S.A. E.S.P.

SERGIO RICARDO VELANDIA FLÓREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2012

ESTUDIO PRELIMINAR Y AJUSTE MATEMÁTICO DE LA REDUCCIÓN DE
CARGA ORGÁNICA EXPRESADA COMO DQO EN UN SISTEMA DE
TRATAMIENTO AEROBIO REALIZADO EN LA PTAR - RÍO FRÍO DE EMPAS
S.A. E.S.P.

SERGIO RICARDO VELANDIA FLÓREZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de Ingeniero
Químico.

DIRECTOR:

Luis Javier López Giraldo

Ingeniero Químico

SUPERVISOR:

Carlos Julio Aparicio Gómez

Profesional Universitario EMPAS S.A E.S.P

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA

2012

DEDICATORIA

Primero que todo a Dios, por llenarme de fortaleza, paciencia y sabiduría a lo largo de este duro camino e iluminarme para culminar el primero de muchos triunfos.

A mis padres, Nancy Flórez Moreno y Luis Enrique Velandia, que con su ejemplo, consejos, enseñanzas y esfuerzos, han hecho de mí, un hombre lleno de valores y cualidades de las cuales me siento orgulloso, y dedicar cada momento de sus vidas para llenarme de amor, confianza y apoyo en todos los momentos de mi vida.

A mi abuelita, Mariela Moreno, por su amor, cariño, consejos y sus mágicas oraciones, que siempre actúa en mí como una guía importante y pilar fundamental en cada uno de mis triunfos.

A mis hermanos, Fabio Alejandro y Juan Camilo, por su apoyo y motivación en momentos difíciles y motor necesario para siempre seguir adelante.

A la universidad y a los profesores, que gracias a los conocimientos inculcados a lo largo de estos años y a su constante asesoría permitieron cumplir mi sueño.

A mis compañeros, por estar rodeado estos años por excelentes personas, que hicieron de la universidad una experiencia inolvidable.

A mis amigos, que siempre con ese apoyo y amistad incalculable, me enseñaron a vivir, sufrir y gozar una de las etapas más lindas de mi vida.

Este logro no es solo mío, es también de ustedes y doy gracias a Dios que hagan parte de éste, NUESTRO TRIUNFO.

SERGIO RICARDO VELANDIA FLÓREZ

AGRADECIMIENTOS

Al profesor Luis Javier López Giraldo por todas sus orientaciones, grandes enseñanzas, colaboración y buena disposición en la elaboración de este trabajo de grado.

Al ingeniero Juan Pablo Vera Mogollón, por brindarme la oportunidad de realizar el trabajo de grado en la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR Río Frío adscrita a la EMPAS S.A. E.S.P.

Un agradecimiento especial a EMPAS S.A E.S.P, a la planta de tratamiento de aguas residuales PTAR Río Frío encabezado por el profesional universitario Carlos Julio Aparicio Gómez por cada una de sus importantes orientaciones; al Administrador Sergio Duban Paredes Celys por compartir cada uno de sus conocimientos y al grupo humano que conforma la parte administrativa y laboratorio, por ver en mí una persona confiable y brindar un apoyo incondicional a lo largo de los últimos meses.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1. MARCO TEORICO	15
1.1. Descripción general del proceso de tratamiento de la PTAR Río Frío	15
1.2. Generalidades de las aguas residuales y parámetros empleados para su caracterización.....	16
1.3. Normas del vertimiento de residuos líquidos a cuerpos de agua	17
1.4. Materia sólida presente en el agua residual.....	18
1.5. Parámetros que caracterizan las aguas residuales.....	19
1.6. Tratamiento Aerobio.....	19
1.7. Importancia del proceso aerobio como post-tratamiento del efluente anaerobio	19
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	20
2.1. Montaje y adaptación del sistema de remediación aerobio de aguas residuales.....	20
2.1.1. Montaje de la Unidad Experimental	20
2.2. Toma de la muestra de agua residual	21
2.3. Caracterización de la muestra de agua residual en el afluente.....	21
2.4. Acondicionamiento de la unidad experimental	22
2.5. Métodos analíticos de seguimiento y caracterización	22
2.5.1. Ensayo de Sólidos Totales (ST)	23
2.5.2. Ensayo de Sólidos Totales Volátiles.....	23
2.5.3. Determinación Pre y Post tratamiento de la DQO	23
2.5.4. Determinación Pre y Post tratamiento de la Turbiedad	24
2.5.5. Determinación de la concentración de oxígeno disuelto.....	24
2.6. Caracterización del lodo activado finalizado el proceso	24
2.7. Ajuste matemático del comportamiento de la DQO final en procesos de tratamiento de aguas residuales	24
2.7.1. Determinación de las variables predictivas y la variable de respuesta 25	
2.7.2. Evaluación del tipo de regresión a emplear para determinar el modelo matemático	25

2.7.3. Análisis de las interacciones entre variables predictivas	25
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	25
3.1. Arranque del reactor piloto con aireación (2,2mg/l) y agitación continua .	25
3.1.1. Estudios realizados con la nueva concentración de oxígeno (7,99 mg/l)	28
3.1.2. Pruebas finales y conclusión del arranque del reactor piloto.....	29
3.2. Ajuste matemático del comportamiento de la DQO final en procesos de tratamiento de aguas residuales	30
3.2.1. Evaluación del modelo y mejor ajuste	31
3.2.2. Validación y predicción del mejor modelo.....	33
4. CONCLUSIONES	35
5. RECOMENDACIONES.....	36
6. BIBLIOGRAFÍA.....	37

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de diseño y operación de la PTAR Río Frío.....	16
Tabla 2. Contaminantes presentes en un agua residual y sus posibles efectos en aguas receptoras.....	16
Tabla 3. Parámetros para la caracterización de ARD	17
Tabla 4. Normas de vertimiento de residuos líquidos. DECRETO 1594 DE 1984	17
Tabla 5. Características iniciales del lodo.....	25
Tabla 6. Características del lodo transcurridas 4 semanas de arranque	27
Tabla 7. Resultados con la nueva concentración de oxígeno disuelto.....	28
Tabla 8. Características del lodo antes y después de 1 semana de adaptación con nivel de oxígeno disuelto de 7,99 mg/l	28
Tabla 9. Caracterización de los lodos transcurridos 25 días del arranque.....	30
Tabla 10. Valores obtenidos experimentalmente	31
Tabla 11. Denominación y unidades de las variables del modelo.....	32
Tabla 12. Predicción del modelo matemático	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema del proceso de tratamiento	15
Figura 2. Clasificación de los tipos de materia sólida contenida en un agua residual.....	18
Figura 3. Unidad experimental.....	21
Figura 4. Porcentajes de remoción de DQO y turbiedad vs tiempo.....	26
Figura 5. Remoción de DQO y turbiedad vs cuarta semana de arranque	27
Figura 6. Resultado finales del arranque del reactor piloto	29

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO PRELIMINAR Y AJUSTE MATEMÁTICO DE LA REDUCCIÓN DE CARGA ORGÁNICA EXPRESADA COMO DQO EN UN SISTEMA DE TRATAMIENTO AEROBIO REALIZADO EN LA PTAR - RÍO FRÍO DE EMPAS S.A. E.S.P.¹

AUTOR: Sergio Ricardo Velandia Flórez.²

PALABRAS CLAVE: Modelo matemático, ajuste multivariable, planta de tratamiento, aguas residuales, tratamiento aerobio, reactor UASB, demanda química de oxígeno.

DESCRIPCIÓN: Con el fin de aumentar los índices en la remoción de carga orgánica en el proceso de tratamiento de aguas residuales, la PTAR Río Frío estudia la implementación de una tecnología aerobia en el efluente anaerobio de los rectores UASB.

Se determinó que cuando se trabajó con una concentración de oxígeno disuelto igual a 7,99 mg/l se obtienen porcentajes de remoción de DQO de aproximadamente el 60%, los cuales concuerdan con los valores de remoción obtenidos al final del proceso convencional empleado en la PTAR Río Frío. Además los resultados obtenidos, aunque preliminares, muestran que es posible reducir en 3 horas los tiempos de retención hidráulica de los procesos empleados para el tratamiento de aguas residuales.

Considerando los parámetros involucrados en el proceso de tratamiento, se realiza el ajuste de un modelo predictivo de la reducción de carga orgánica en el efluente (DQO_{final}) en función de las características iniciales del afluente ($DQO_{inicial}$, turbiedad y concentración de oxígeno disuelto). El modelo matemático obtenido tiene una capacidad de predicción de la DQO a la salida del proceso cercana al 72%. A pesar que el ajuste no puede considerarse como óptimo, se destaca el hecho que el modelo considera como variables independientes las que normalmente se monitorean en la PTAR Río Frío.

¹ Proyecto de Grado

² Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Luis Javier López Giraldo. Supervisor: Carlos Julio Aparicio Gómez

ABSTRACT

TITULO: PRELIMINARY STUDY AND MATHEMATICAL ADJUSTMENT OF ORGANIC LOAD REDUCTION EXPRESSED AS COD IN AN ANAEROBIC TREATMENT SYSTEM IMPLEMENTED IN THE PTAR - RÍO FRÍO OF EMPAS S.A. E.S.P.¹

AUTOR: Sergio Ricardo Velandia Flórez.²

KEY WORDS: mathematical model, multivariable adjustment, treatment plant, sewage, aerobic treatment, upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor, chemical oxygen demand (COD).

DESCRIPCIÓN: In order to increase rates of organic load removal in sewage treatment process, the PTAR of Rio Frio studies the implementation of an anaerobic technology in the anaerobic effluent of the UASB reactors.

It was determined that working with a dissolved oxygen concentration equal to 7.99 mg /L, are obtained COD removal rates of about 60%, which agree with the removal values obtained at the end of the conventional process employed in the PTAR Rio Frio. In addition, the results obtained, although preliminary, show that is possible to reduce 3 hours the hydraulic retention times of the processes employed for the treatment of sewage.

Considering the parameters involved in the treatment process, it is made an adjustment of a predictive model of organic load reduction in the effluent (COD_{output}) based on the initial characteristics of the influent (COD_{initial}, turbidity and dissolved oxygen concentration). The mathematical model obtained has a capacity of prediction of COD in output of the process close to 72%. Although the adjustment can not be considered as optimal, it is noteworthy the fact that the model considered as independent variables, variables normally monitored in the PTAR Rio Frio.

¹Final Degree Project

² Physical-Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Project Director: Luis Javier López Giraldo. Supervisor: Carlos Julio Aparicio Gómez

INTRODUCCIÓN

La planta de tratamiento de aguas residuales PTAR Río Frío, es la encargada de realizar un tratamiento completo de los residuos domésticos generados por los municipios de Floridablanca, Girón y la zona sur de Bucaramanga.

Este tipo de aguas poseen un alto potencial de contaminación debido a su elevado contenido de carga orgánica, representado entre otros, por sólidos suspendidos totales (SST), demanda química y biológica de oxígeno (DBO, DQO). Además, este tipo de aguas podrían contener diversas sustancias que provienen del sector industrial.

Con el fin de aminorar la carga orgánica y mitigar así el impacto contaminante de los vertimientos al Río Frío, la PTAR cuenta con un sistema de tratamiento tipo UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*). Esta planta posee cuatro (4) reactores UASB de 3360 m³ de volumen cada uno y dos (2) lagunas facultativas de 2,7ha en la etapa post-tratamiento. Con este sistema el efluente se mantuvo en 156 - 170 g/m³ de DQO (56-60% de remoción); 35 - 41 g/m³ de DBO (72-76% de remoción) y 72 - 78 g/m³ de SST (67-70% de remoción), con un tiempo de retención hidráulico (TRH) total de aproximadamente de 24 horas.

A pesar de la efectividad de la configuración empleada por la PTAR Río Frío, las tendencias actuales y el aumento de la actividad industrial hacen necesaria la evolución del sistema para tratar aguas residuales con un alto contenido de materia orgánica (MO).

Una de las estrategias para mejorar la remoción de carga orgánica en aguas que contienen material de difícil eliminación (grasas y aceites) es la combinación del tratamiento anaerobio/aerobio con el cual se reducen las fluctuaciones de los reactores UASB utilizados en la disminución de DQO y consecuentemente se

mejora los porcentajes de remoción dando cumplimiento a las normativas de descargas de efluentes ([Decreto 1594 de 1984](#)). Además, las tecnologías aerobias convencionales basadas en lodos activados, poseen una alta eficiencia de remoción, mayor eliminación de nutrientes y reducción considerable de malos olores (H₂S) ([Sumino, et al.,2007](#); [Kassab, et al., 2010](#)).

Es así que en este trabajo (modalidad práctica) se estudia el efecto que tiene el tratamiento aerobio sobre la remoción de carga orgánica a escala laboratorio de aguas típicamente tratadas por la PTAR Río Frío. Además, se realiza el ajuste de un modelo predictivo de la disminución de carga orgánica (DQO del efluente) en función de la carga orgánica del afluente y las condiciones de aireación-agitación.

1. MARCO TEORICO

1.1. Descripción general del proceso de tratamiento de la PTAR Río Frío

El proceso de tratamiento de aguas residuales consta de tres etapas: (i) Preliminar, (ii) Primario y (iii) Secundario, donde en el transcurso de estos ciclos, el agua es sometida a procesos de eliminación de residuos sólidos, sedimentación de arenas presentes y degradación de materia orgánica gracias a bacterias especializadas dentro de un reactor UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*).

El tratamiento preliminar (TRH = 3h) consiste en la eliminación de sólidos, partículas gruesas y arenas de las aguas residuales empleando un juego de cribados de distintos diámetros y un desarenador. El objetivo del tratamiento primario es someter el agua residual a un proceso anaerobio con ayuda de bacterias especializadas que asimilan la materia orgánica dentro del reactor UASB (TRH = 6h). Por último, el tratamiento secundario donde se completa la degradación de la materia orgánica, ocurre en una laguna facultativa (TRH = 15h) gracias a la acción de microorganismos aerobios y anaerobios que conducen a rendimientos de remoción cercanos al 85%. La descripción esquemática así como las principales características de operación de la PTAR Frío se muestran respectivamente en la Figura 1 y Tabla 1.



Figura 1. Esquema del proceso de tratamiento

Fuente: Archivo EMPAS S.A. E.S.P.

Tabla 1. Características de diseño y operación de la PTAR Río Frío

PARÁMETRO	UNIDADES	VALORES
Caudal de diseño	m ³ /s	0,72
Población beneficiada	Habitantes	320 000
Caudal promedio tratado	m ³ /día	42 000
Producción de Lodo deshidratado al 90%	m ³ /mes	150
Producción de biogás	m ³ /día	7 400

Fuente: Archivo EMPAS S.A. E.S.P.

1.2. Generalidades de las aguas residuales y parámetros empleados para su caracterización

El agua residual se define como un residuo líquido recogido mediante la red de alcantarillado para el envío a una planta de tratamiento. El factor que más influye en el proceso de depuración del agua, es su composición. En la Tabla 2, se resumen los principales contaminantes que se pueden encontrar en un agua residual y los efectos sobre el medio receptor [3].

Tabla 2. Contaminantes presentes en un agua residual y sus posibles efectos en aguas receptoras

Contaminantes del Agua	Impactos más significativos
Materia en suspensión	Aumento de la turbidez del agua. Sedimentación, obstruyendo y cubriendo el lecho de los ríos.
Compuestos inorgánicos	Ecotoxicidad de algunos compuestos, como las sales de metales pesados. Reacciones con sustancias disueltas en el agua pasando a formas de compuestos peligrosos.
Conductividad	Concentraciones elevadas de sales impiden la supervivencia de diversas especies vegetales y animales.
Nutrientes	Crecimiento anormal de algas y bacterias (aumento de la turbidez del agua). Eutrofización del agua.
Materia orgánica	Su descomposición puede provocar la disminución de la concentración de oxígeno disuelto del agua hasta alcanzar condiciones sépticas. Eutrofización del agua. Emisión de metano en caso de aparición de procesos anaerobios.
Compuestos orgánicos tóxicos	Toxicidad para la vida acuática. Disminución en la concentración de oxígeno debido a los procesos de biodegradación. Producción, en el caso de líquidos no miscibles de una película superficial que impide la aireación del agua.
Organismos patógenos	Inutilización del agua para uso humano. Contaminación de los organismos acuáticos que pueden

llegar al hombre en la cadena alimenticia.
Enfermedades de transmisión hídrica asociadas a la contaminación microbiológica del agua.

Fuente: Dewisme, 1997; Matia et al, 1999

Según su origen, las aguas residuales pueden ser clasificadas en: (i) domésticas y urbanas, (ii) industriales, (iii) agropecuarias, (iv) de origen incontrolado y (v) pluvial. Las Aguas Residuales Domésticas (ARD) poseen una composición variada debido a los factores que la afectan y a la naturaleza de la población. Sin embargo se puede caracterizar a través de los factores contemplados en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros para la caracterización de ARD

Físicos	Químicos	Biológicos
Sólidos totales (ST), mg/L <ul style="list-style-type: none"> Suspendidos Volátiles 	Materia orgánica, mgO ₂ /L <ul style="list-style-type: none"> DBO₅ DQO 	Organismos patógenos <ul style="list-style-type: none"> Coliformes, número/100mL Virus, ufc^(b)/100mL
Temperatura, °C	pH	
Turbiedad, UNT ^(a)	Alcalinidad, mg CaCO ₃ /L	
	Nitrógeno, mg N/L <ul style="list-style-type: none"> Orgánico Amoniacal Nitritos Nitratos 	
	Fósforo, mg P/L <ul style="list-style-type: none"> Orgánico Reactivo soluble 	

(a) Unidades nefelométricas de turbiedad

(b) Unidades formadoras de colonias

Fuente: Directiva 91/271; Escaler, 1997.

En cuanto al agua residual industrial, es aquella que está compuesta por residuos de la actividad comercial o industrial (aguas de proceso y refrigeración). La contaminación presente en estas aguas es mucho más difícil de eliminar debido a su alta carga orgánica y a la variabilidad de sustancias presentes en ella [4].

1.3. Normas del vertimiento de residuos líquidos a cuerpos de agua

Cualquier tipo de vertimiento a un cuerpo de agua debe cumplir con las siguientes normas:

Tabla 4. Normas de vertimiento de residuos líquidos. DECRETO 1594 DE 1984

Parámetro evaluado	Valor aceptado
pH	5 a 9 unidades
Temperatura	< 40°C
Ácidos, bases o soluciones ácidas o básicas	Ausentes

que puedan causar contaminación; sustancias explosivas o inflamables.	
Sólidos Sedimentables	10mg/l

Continuación Tabla 4. Normas de vertimiento de residuos líquidos. DECRETO 1594 DE 1984

Sustancias solubles en hexano	100mg/l
Sólidos suspendidos para desechos domésticos e industriales	Remoción > 80% en carga
Demanda bioquímica de oxígeno <ul style="list-style-type: none"> • Desechos domésticos • Desechos industriales 	Remoción > 80% en carga Remoción > 80% en carga
Demanda química de oxígeno: <ul style="list-style-type: none"> • Desechos domésticos • Desechos industriales 	Remoción > 70% en carga Remoción > 70% en carga

1.4. Materia sólida presente en el agua residual

El agua residual puede presentar una gran variedad de materia sólida que puede expresarse de muchas formas: disuelta o particulada (suspensión). Es primordial señalar la presencia de esos sólidos, ya que por su naturaleza transmiten propiedades indeseables al agua; y su concentración ayuda a predecir el grado de depuración que puede obtenerse en las distintas etapas de tratamiento [5].

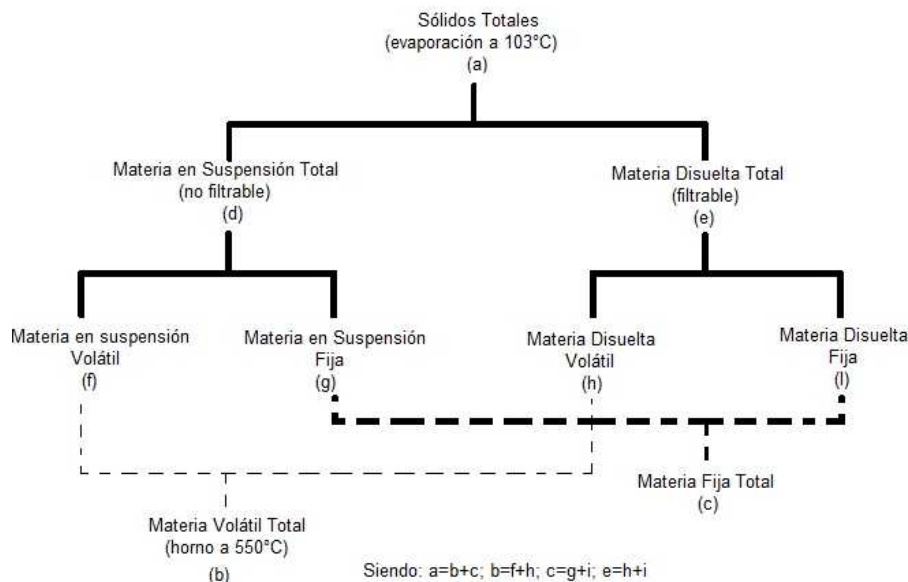


Figura 2. Clasificación de los tipos de materia sólida contenida en un agua residual

1.5. Parámetros que caracterizan las aguas residuales

La Materia Orgánica (MO) está constituida por una fracción particulada y una fracción disuelta (ver figura 2). La materia volátil, permite una estimación de la cantidad de MO presente en el agua residual. Para una información más precisa, es necesario evaluarla mediante el oxígeno requerido para oxidar totalmente la MO a CO_2 , H_2O y NH_3 . Los compuestos orgánicos del agua residual poseen al menos un átomo de carbono dentro de su estructura, denominados compuestos carbonosos; que pueden ser oxidados química o biológicamente para producir CO_2 . El método para determinar la materia orgánica mediante oxidación biológica y oxidación química se denominan respectivamente: Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO) [5]. También, se determina la presencia de partículas en suspensión por medio la Turbiedad que en sí misma es un indicador de la calidad del agua en el afluente. Finalmente, la cantidad de oxígeno disuelto resulta un parámetro determinante en los procesos metabólicos y catabólicos de los microorganismos encargados de la asimilación de la materia orgánica [6].

1.6. Tratamiento Aerobio

Proceso en el cual los microorganismos ejecutan la oxidación, utilizando oxígeno molecular como aceptor de hidrógeno, formando H_2O [6]. Este proceso, ha demostrado obtener mejores resultados en lo que se refiere a la degradación de MO con Tiempos de Retención Hidráulica (THR) menores a los obtenidos con tratamientos tradicionales. Además este tipo de proceso reduce la emanación de molestos olores producidos por el ácido sulfhídrico (H_2S).

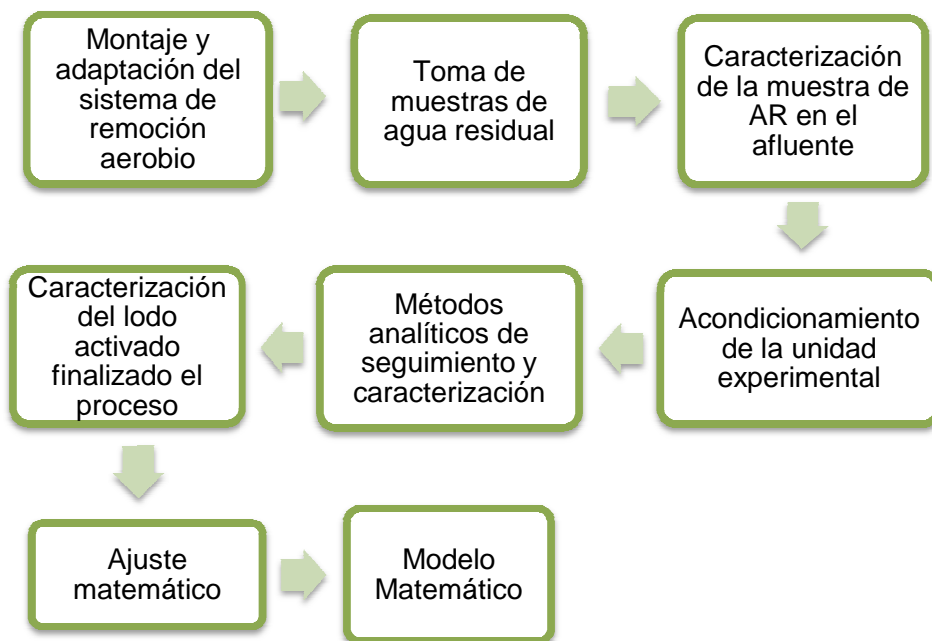
1.7. Importancia del proceso aerobio como post-tratamiento del efluente anaerobio

Las altas concentraciones de MO, residuos generados de la industria, entre otros, se han ido convirtiendo en un problema en el proceso de tratamiento afectando seriamente los porcentajes de remoción y generando dificultades al momento de cumplir las normativas ([Decreto 1594 de 1984](#)) que rigen descargas de efluentes.

En estudios realizados por [Sumino, et al. \(2007\)](#) se subraya la importancia de un post-tratamiento del efluente anaerobio con el fin de mejorar la remoción de MO.

En la actualidad, los procesos anaerobios-aerobios han sido implementados a escala laboratorio y se han observado resultados favorables: aumento de la relación eficiencia vs costo, ahorro de energía (~ 40%), fácil operación, reducción en la producción de lodos (~ 60%) y disminución de malos olores ([Kassab, et al., 2010](#)).

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL



2.1. Montaje y adaptación del sistema de remediación aerobio de aguas residuales

2.1.1. Montaje de la Unidad Experimental

La unidad experimental tiene un volumen máximo de 5 litros, puntos de alimentación y descargue; esta última cuenta con un sistema de aireación por

burbujeo acoplado a un compresor y un sistema de agitación magnético, ver Figura 3

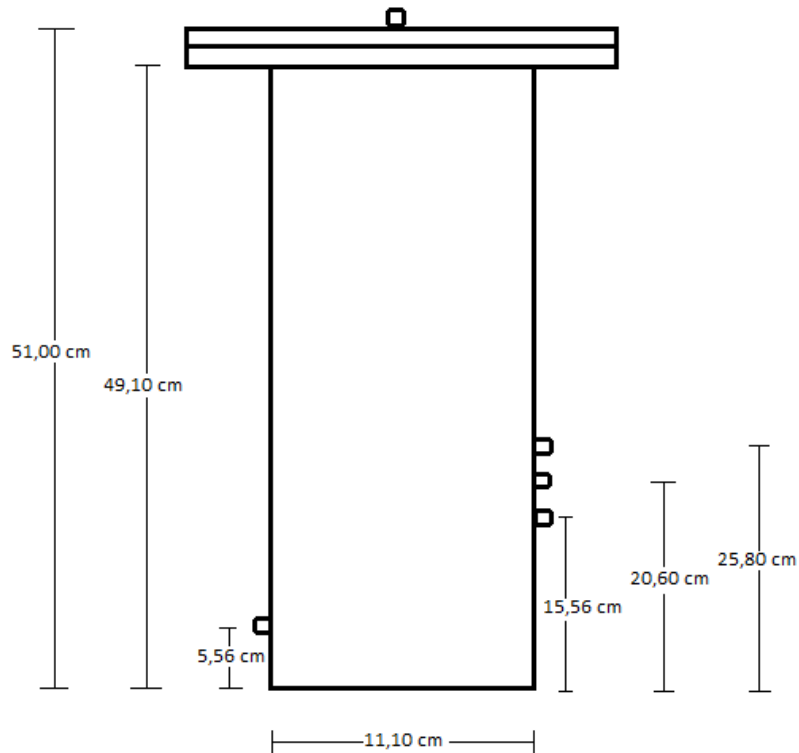


Figura 3. Unidad experimental

2.2. Toma de la muestra de agua residual

El muestreo se hace de manera manual por el operador de turno en un punto denominado pozo de distribución, es decir, el lugar donde llega el agua residual (afluente) proveniente de la ciudad para ser distribuida en cada uno de los reactores UASB que posee la PTAR- Río Frío [7]. La muestra es recolectada en un recipiente de plástico de capacidad de 3 litros, que ha sido previamente purgado con el fin de evitar alteraciones en la muestra por contaminación.

2.3. Caracterización de la muestra de agua residual en el afluente

Con el fin de conocer las condiciones iniciales del agua residual, ésta es caracterizada mediante la determinación de DQO y Turbiedad (véanse secciones 2.5.3. y 2.5.4.).

2.4. Acondicionamiento de la unidad experimental

Inicialmente la unidad experimental es cargada con 300ml de lodo (~ 3 cm de altura del sistema experimental), proveniente de la planta de tratamiento de aguas residuales San Pedro. A éste último se le ha realizado previamente una caracterización de sólidos suspendidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV) (véanse secciones 2.5.1. y 2.5.2.). Después de caracterizar y cargar el lodo, se introducen 2500 ml de agua residual y se permite que el sistema desarrolle una pre-estabilización durante un período de 6 horas (durante este período el lodo se adapta y crece bajo las nuevas condiciones de aerobiosis).

Al cumplirse el tiempo, el sistema es desconectado con el fin provocar la sedimentación de partículas y lodo formado, se retira el agua tratada y se deposita una nueva cantidad de agua residual para comenzar de nuevo el proceso durante un periodo de 2 semanas. En estas dos semanas, se llevaron a cabo las pruebas de caracterización del efluente para analizar la capacidad de remoción del proceso y determinar si existe una adaptación y un crecimiento de bacterias degradadoras.

Al completarse el arranque del reactor, es decir, al verificarse que hay un crecimiento y adaptación de bacterias al proceso así como una remoción considerable y constante de MO del agua residual, se definen los tiempos de retención hidráulica (TRH). El TRH es de vital importancia, ya que define el tiempo que el agua residual estará sometida a tratamiento. Con la finalidad de obtener la máxima remoción en el proceso se definen 18 horas de operación para el reactor piloto, con una toma de muestras (DQO y Turbiedad) de dos veces por semana en un periodo de estudio constituido de cuatro meses aproximadamente.

2.5. Métodos analíticos de seguimiento y caracterización

2.5.1. Ensayo de Sólidos Totales (ST)

La determinación de sólidos suspendidos totales se hace siguiendo el procedimiento 2540 G del US Standar Methods (Ed 17/1989). Los sólidos totales se calculan con los pesos hallados después de evaporar la muestra en baño maría y posterior secado de la muestra en estufa a 105°C durante una hora, los resultados se reportan en mg/l.

WA= Peso de la cápsula (g)

WB= Peso de la cápsula más residuo (g)

$$\text{Sólidos Totales en mg/L} = \frac{(WB - WA) \times 1E6}{(\text{Volumen de muestra en mL})}$$

2.5.2. Ensayo de Sólidos Totales Volátiles

La determinación de sólidos suspendidos totales se hace siguiendo el procedimiento 2540 G del US Standar Methods (Ed 17/1989). Los sólidos volátiles se calculan con los pesos hallados después de incinerar la muestra en una mufla a 550°C por un tiempo de 20 a 30 minutos, los resultados se reportan en mg/l.

WB= Peso de la cápsula más residuo (g)

WC= Peso de la cápsula más residuo, después de retirada la muestra de la mufla

$$\text{Sólidos Totales Volátiles en mg/L} = \frac{(WB - WC) \times 1E6}{(\text{Volumen de muestra en mL})}$$

2.5.3. Determinación Pre y Post tratamiento de la DQO

La DQO se determina siguiendo el procedimiento 5220 D (US Standard Methods ed. 17/1989) con ligeras modificaciones. Brevemente, se mezclan 0,3ml de dicromato de potasio (Solución A), 2,3ml de sulfato de plata (Solución B) y 3ml de la muestra a analizar en un tubo de ensayo y se lee la absorbancia en un espectrofotómetro MERCK NOVA 60 a una longitud de onda de 690nm. En esta prueba se analiza la concentración de iones $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ amarillos no consumidos. Los resultados son reportados en mg/l. El porcentaje de remoción de DQO es determinado por la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Remoción DQO} = \frac{\text{DQO Entrada} - \text{DQO Salida}}{\text{DQO Entrada}} \times 100$$

2.5.4. Determinación Pre y Post tratamiento de la Turbiedad

El procedimiento se realiza con ligeras modificaciones de la norma ISO 7027. Para este caso 10ml de la muestra son pipeteados a una cubeta de cuarzo de 50mm y seguidamente se analiza la absorbancia de la muestra a una longitud de onda de 690nm en un espectrofotómetro MERCK NOVA 60. El porcentaje de remoción de Turbiedad se determina por la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Remoción TURBIEDAD} = 1 - \frac{\text{TURBIEDAD Salida}}{\text{TURBIEDAD Entrada}} \times 100$$

2.5.5. Determinación de la concentración de oxígeno disuelto

La determinación se lleva a cabo por medio de un Oxímetro HANNA HI 9146-04/10, que posee dos sondas para medir la concentración de oxígeno y la temperatura del agua con una alta precisión. El agua residual se tratará empleando dos diferentes niveles de concentración de oxígeno disuelto, 2,2 y 7,99mg/l.

2.6. Caracterización del lodo activado finalizado el proceso

Realizado con el fin de conocer la situación actual del lodo, ya que dependiendo de la concentración de ST y la concentración de MO (SV), la remoción puede ser buena; de lo contrario, estos parámetros nos permitirían detectar algún tipo de problema en el funcionamiento.

2.7. Ajuste matemático del comportamiento de la DQO final en procesos de tratamiento de aguas residuales

Una de las finalidades de este estudio, es realizar una predicción de la remoción de la carga orgánica presente en aguas residuales expresada en DQO, a partir de valores iniciales conocidos. En este proceso, existe la interacción de variables que se involucran de manera directa o indirecta; es de gran importancia hallar aquellas

variables que se consideran vitales en la determinación del porcentaje de remoción de carga orgánica presente en aguas residuales.

2.7.1. Determinación de las variables predictivas y la variable de respuesta

Con base en el estudio bibliográfico y considerando las limitaciones analíticas propias de la práctica, las variables seleccionadas fueron la DQO_{entrada} , Turbiedad y la concentración de Oxígeno disuelto.

2.7.2. Evaluación del tipo de regresión a emplear para determinar el modelo matemático

Examinado el proceso, existe una variable de respuesta en función de tres variables independientes y por tal motivo se decide emplear un ajuste del tipo multivariable.

2.7.3. Análisis de las interacciones entre variables predictivas

Con el fin de obtener el mejor ajuste a los datos obtenidos, se estudiaron un sinnúmero de posibilidades de interacciones (Ecuación 1). Los ajustes se realizarán empleando como herramienta informática el software Statgraphics Centurion XV (versión de prueba). El mejor ajuste se obtiene al hallar el coeficiente de determinación R^2 y el R^2_{ajustado} [8].

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Arranque del reactor piloto con aireación (2,2mg/l) y agitación continua

El sistema experimental fue cargado tal como se declaró en la sección 2.4 con una concentración de oxígeno inicial de 2,2 mg/l. Las características iniciales del lodo antes del arranque se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Características iniciales del lodo

Prueba	Valor (mg/l)
ST	2183

SV	1324
----	------

Durante los primeros seis días de trabajo en el arranque del reactor, se realizan los respectivos análisis de DQO y turbiedad en el efluente. Los resultados se muestran en la Figura 4.

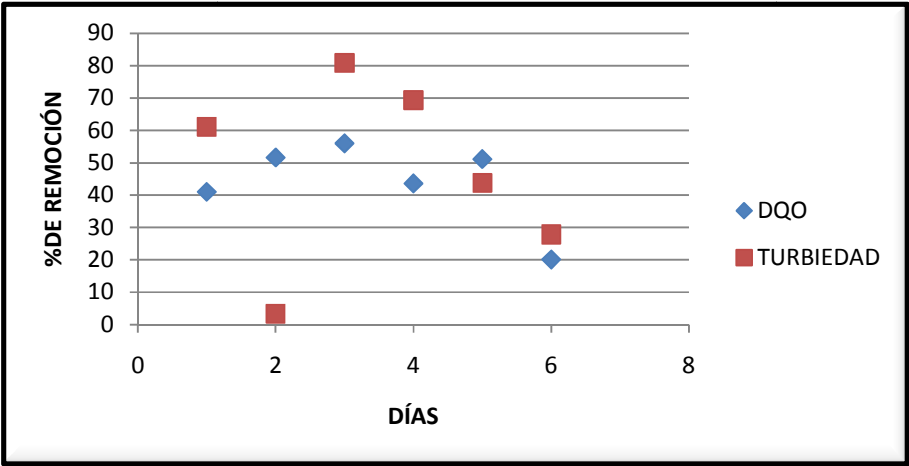


Figura 4. Porcentajes de remoción de DQO y turbiedad vs tiempo

Los porcentajes de remoción para ambos parámetros presentan un comportamiento aleatorio. Además, a partir del tercer día los porcentajes decaen significativamente insinuando la existencia de algún problema en el funcionamiento del reactor. Estos resultados permiten inferir que la fase de adaptación y crecimiento de los microorganismos degradadores de MO no se ha completado en este lapso de tiempo.

Transcurridas ya cuatro semanas de funcionamiento, dos más de las propuestas para el arranque, se han ido presentando problemas que se pueden detectar a simple vista como la disminución en la altura del lodo.

Esta dificultad con el lodo, puede presentarse por una sobrecarga orgánica debido a deficiencias de oxigenación, lo que produce una fermentación ácida que se vuelve predominante consumiendo lentamente la biomasa (lodo) y acidificando el

sistema [6]. Con el fin de validar esta hipótesis, se procede a realizar el análisis del lodo (Tabla 6).

Tabla 6. Características del lodo transcurridas 4 semanas de arranque

Prueba	Valor (mg/l)
ST	1475
SV	885

Comparando las características del lodo cargado inicialmente (Tabla 5) con las obtenidas después del tratamiento aerobio se puede apreciar que las concentraciones de ST y SV han disminuido respectivamente 32,4 y 33,2%. Un factor que puede estar influyendo en esta problemática puede ser la baja concentración de oxígeno disuelto [6].

La disminución de ST y SV en los lodos tienen un efecto directo sobre la capacidad del lodo a reducir la MO orgánica presente en las aguas tratadas. Tal como aparece en la Figura 5, los porcentajes de remoción de DQO y turbiedad sólo alcanzan valores cercanos al 40 y 50% respectivamente; los cuales se encuentran en niveles inferiores a los que típicamente se esperan en este tipo de procesos (60 – 70%).

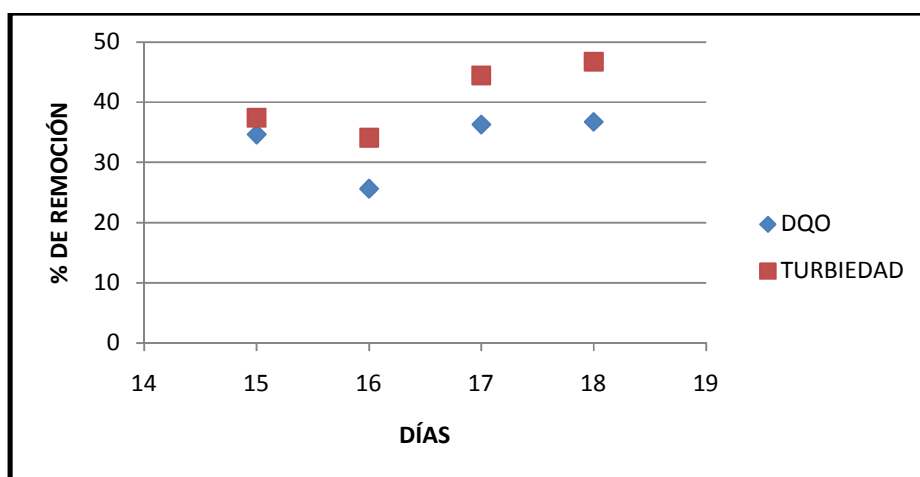


Figura 5. Remoción de DQO y turbiedad vs cuarta semana de arranque

Aunque los porcentajes de remoción de ambos parámetros son considerados bajos, el sistema de tratamiento alcanzó la estabilidad.

3.1.1. Estudios realizados con la nueva concentración de oxígeno (7,99 mg/l)

Con el objetivo de mejorar la asimilación de oxígeno por parte de las bacterias aerobias, se incorporan al sistema difusores porosos de burbuja fina. Estos difusores aumentarán la transferencia de oxígeno en el licor mezclado, creando un ambiente más aireado donde las bacterias trabajaran más eficientemente aumentando en teoría la remoción de MO.

Durante la primera semana de adaptación con la nueva concentración de oxígeno disuelto, se realizan los respectivos análisis en el efluente y caracterización de los lodos. En la Tabla 7 se muestran algunos de los resultados obtenidos con aguas residuales típicas que trabaja la PTAR Río Frío.

Tabla 7. Resultados con la nueva concentración de oxígeno disuelto

PRUEBA	Valor Inicial	Valor Final	% REMOCIÓN
DQO (ppm)	432	222	48,6
	458	188	58,9
	328	144	56
TURBIEDAD (ppm)	150	42	72
	167	53	68,32
	136	47	65,44

De los resultados tabulados se puede apreciar que los porcentajes de remoción de DQO y turbiedad han alcanzado niveles superiores al 50% y que tan sólo fue necesaria una semana para alcanzar la estabilidad del proceso.

Por otra parte, se ha detectado un aumento leve en la altura del lodo, lo que indica que el aumento en la remoción y la velocidad de adaptación podría deberse a las nuevas condiciones del proceso. Se procede a caracterizar el lodo con el fin de confirmar estas hipótesis.

Tabla 8. Características del lodo antes y después de 1 semana de adaptación con nivel de oxígeno disuelto de 7,99 mg/l

Prueba	Valor inicial	Valor final (mg/l)
ST	1490	2186
SV	890	1308
Concentración O ₂	7,99	

A partir de los resultados obtenidos se aprecia que bajo las nuevas condiciones de aireación los niveles de ST y SV aumentan aproximadamente un 32 %. Además, se observó un aumento de 133 % del volumen del lodo (aproximadamente 7cm). Estos resultados podrían explicarse si se considera que bajo las nuevas condiciones de aireación las bacterias se adaptan más rápidamente (reducción del tiempo de estabilización), al tiempo que se disminuyen los riesgos de acidificación y consecuente pérdida de biomasa.

3.1.2. Pruebas finales y conclusión del arranque del reactor piloto

Una vez determinado que la concentración de oxígeno disuelta de 7,99 mg/l es la más adecuada para llevar a cabo el proceso aerobio de remoción de carga orgánica, se procedió a efectuar una prueba final para verificar la estabilidad de los lodos así como los valores críticos por encima de los cuales la remoción comienza a ser ineficiente. Para tal fin, el sistema experimental fue monitoreado durante 6 semanas. Los resultados de la última semana de experimentación pueden apreciarse en la Figura 6. Sólo se muestran estos resultados ya que es en este intervalo de tiempo que el sistema mostró una perturbación.

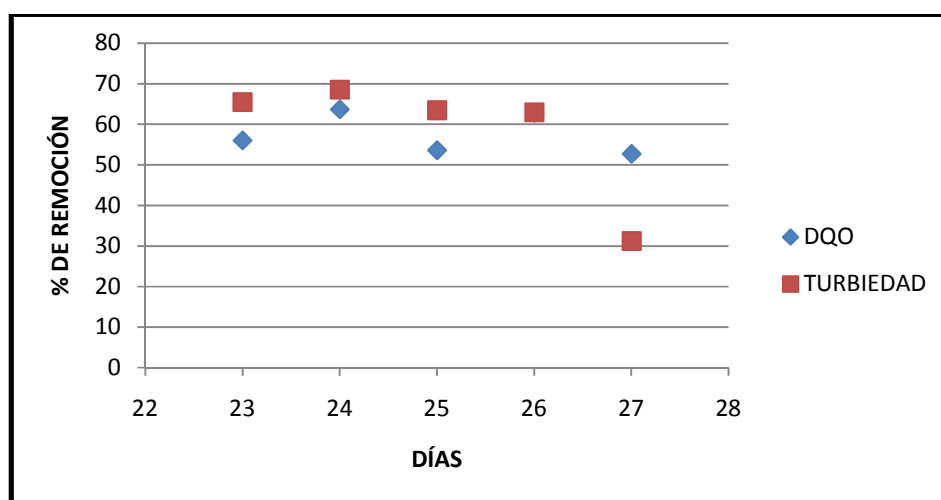


Figura 6. Resultado finales del arranque del reactor piloto

Los resultados presentados muestran que hasta el día 26 los porcentajes de remoción de DQO y turbidez se mantienen en los valores obtenidos después de la

estabilización (~ 55 y 68% respectivamente). Sin embargo, el día 27 el porcentaje de remoción de la variable turbiedad disminuye abruptamente hasta un valor cercano al 30%.

Esta caída estrepitosa en el porcentaje de remoción puede ser ocasionada por un aumento en la concentración de los lodos y una consecuente saturación, por eso se realiza la caracterización de los lodos.

Tabla 9. Caracterización de los lodos transcurridos 25 días del arranque

Prueba	Valor (mg/l)
ST	3415
SV	2080
Concentración O ₂	7,99

En la Tabla 8, se evidencia un incremento en la concentración de lodo y visualmente se confirma que la altura supera los 10cm, alrededor de 1000ml, con la formación de flóculos que impiden el buen desempeño del reactor. Estos problemas se originan por lodos muy maduros y sobreoxidados (alta concentración de biomasa).

De lo anterior, se confirma la necesidad de una purga para eliminar el exceso de lodo, en este caso, se elimina el 70% del lodo formado dejando en el interior del reactor un poco más de 300ml que fue la carga inicial. Este trabajo se repite cuando la altura del lodo se acerca a los 10cm, con el fin de evitar futuras complicaciones.

Otro resultado interesante es que cuando se compara el tiempo de retención del proceso convencional (etapas primaria y secundaria) y el obtenido con el tratamiento aerobio se consigue una reducción de 3 horas sin sacrificar los porcentajes de remoción de DQO.

3.2. Ajuste matemático del comportamiento de la DQO final en procesos de tratamiento de aguas residuales

El ajuste matemático que permita predecir la DQO final en el proceso de tratamiento de aguas residuales se realiza empleando los valores obtenidos

experimentalmente (Tabla 10). La selección de las variables (dependientes e independientes) y del método de regresión empleados fueron los declarados en las secciones 2.7.1. y 2.7.2.

Tabla 10. Valores obtenidos experimentalmente

DQO Entrada	DQO Salida	TURBIEDAD Entrada	OXIGENO Disuelto
A	B	C	D
388	229	144	2,2
356	172	147	2,2
328	144	120	2,2
328	262	104	2,2
306	200	147	2,2
402	299	126	2,2
394	251	117	2,2
324	205	137	2,2
432	222	150	2,2
458	188	167	2,2
328	144	136	2,2
562	204	184	7,99
518	212	182	7,99
386	179	114	7,99
318	158	176	7,99
589	168	179	7,99
566	136	201	7,99
372	176	109	7,99
479	134	203	7,99
392	140	166	7,99
320	160	168	7,99
262	70	183	7,99
177	82	177	7,99
318	158	318	7,99
561	171	184	7,99
487	129	215	7,99
354	115	187	7,99

3.2.1. Evaluación del modelo y mejor ajuste

En la Tabla 11, se presenta la nomenclatura asignada a cada una de las variables al definir los modelos, así como su respectiva unidad.

Tabla 11. Denominación y unidades de las variables del modelo

DENOMINACIÓN	VARIABLE	UNIDADES
DQO _e	Demanda Química de Oxígeno inicial	mg/l
DQO _s	Demanda Química de Oxígeno salida	mg/l
TURB _e	Turbiedad entrada	mg/l
O ₂	Concentración de oxígeno disuelto	mg/l

Se inicia con un modelo simple sin interacciones entre las variables independientes (Ecuación 1)

$$DQO_{final} = \beta_0 + \beta_1 DQO_{entrada} + \beta_2 TURB_{entrada} + \beta_3 O_2 + \varepsilon \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde ε es el error aleatorio. Con este modelo se obtiene un R² de 51,1872%, concluyéndose que no ajusta correctamente los datos experimentales.

Tomando como base el primer modelo analizado, se fueron utilizando diversas opciones, en las que se consideraran o no cada una de las variables y sus interacciones.

El mejor ajuste para predecir la remoción de carga orgánica expresada en DQO, se obtiene con un modelo que considera la interacción de todas las variables independientes. El modelo obtenido tiene un R² de 71,9113% y su formulación matemática es la expresada en la Ecuación 2.

$$DQO_{final} = \beta_0 + \beta_1 DQO_e + \beta_2 TURB_e + \beta_3 O_2 + \beta_4 DQO_e * TURB_e + \beta_5 DQO_e * O_2 + \beta_6 TURB_e * O_2 + \varepsilon \quad \text{Ecuación 2}$$

El modelo obtenido tiene un error del 28,0887%; éste puede asociarse con errores de medida, toma de muestras, contaminación y omisión de variables relevantes que expliquen el fenómeno de disminución de carga orgánica (DBO, NTK (Nitrógeno Total Kjeldahl) y NH₄-N (Nitrógeno Amoniacal)). Sin embargo, el grado

de ajuste del modelo (70%) aunque bajo, es cercano con los valores de predicción reportado por otros autores (Kunwar, et al.,2009).

La ecuación de regresión calculada por el software estadístico Statgraphics Centurion XV es la siguiente:

$$DQO_{final} = -236,825 + 2,10269 * DQO_e - 0,0105045 * \beta_4 DQO_e * TURB_e - 44,6464 * O_2 + 1,65891 * TURB_e + 0,233869 * TURB_e * O_2 + \epsilon$$

En un análisis más profundo, sería conveniente considerar la DBO, NTK (Nitrógeno Total Kjeldahl) y NH₄-N (Nitrógeno Amoniacal). Para el alcance específico de este trabajo los parámetros mencionados no fueron estudiados y analizados ya que en el laboratorio no se realizaban estas determinaciones. Por tal motivo, el modelo propuesto puede presentar algunos problemas ya que en su formulación no se consideraron todas las variables involucradas en procesos de tratamiento de aguas residuales.

3.2.2. Validación y predicción del mejor modelo

Para determinar el poder de predicción que posee este modelo, se realizó un análisis donde se determinaba la DQO_{calculada} en una serie de datos que no fueron considerados durante el tratamiento estadístico. Los parámetros empleados y los resultados de la predicción, valor experimental y error se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Predicción del modelo matemático

DQO _e	TURB _e	O ₂	DQO _{exp}	DQO _{cal}	%DE ERROR
394	137	2,2	222	224,159666	0,97282234
362	112	2,2	166	243,655494	46,7804178
458	171	7,99	182	149,997339	17,5838797
440	190	7,99	174	123,687093	28,9154639
580	214	7,99	236	77,0819123	67,3381727
495	205	7,99	130	104,479955	19,6308038
343	115	7,99	163	118,988112	27,0011582
350	143	7,99	155	121,077372	21,8855662

Los resultados de la tabla 12 corroboran que el modelo puede emplearse para la predicción de la DQO a la salida con una incertidumbre de aproximadamente el 28%, típica de este tipo de ajustes (Kunwar, et al.,2009). Además se confirma que

sí se emplean valores diferentes a los empleados para el ajuste, el error promedio de predicción permanece constante. Es importante subrayar que tanto las aguas residuales como el sistema de tratamiento en general se caracterizan por tener una alta variabilidad, lo que repercute en la exactitud de los modelos propuestos (Kunwar, *et al.*,2009).

4. CONCLUSIONES

Analizando la influencia de la concentración del oxígeno disuelto sobre los porcentajes de remoción expresados en DQO se concluye que con la concentración de 7,99 mg/l el proceso es 1,29 veces más eficiente. Resultado que está acorde con el hecho que las bacterias o microorganismos trabajan de una forma más acelerada sobre el sustrato, eliminando eficazmente la carga orgánica presente y reduciendo en teoría los tiempos de retención hidráulica.

Los resultados obtenidos, aunque preliminares, mostraron una reducción de 3 horas en el tiempo de retención cuando se le compara con el proceso que actualmente se emplea en la PTAR Río Frío.

El modelo matemático obtenido tiene una capacidad de predicción de la DQO a la salida del proceso cercana al 72%. A pesar que el ajuste no puede considerarse como óptimo, se destaca el hecho que el modelo considera como variables independientes las que normalmente se monitorean en la PTAR Río Frío.

5. RECOMENDACIONES

Se sugiere:

Evaluar la influencia del tiempo de retención hidráulica sobre el porcentaje de remoción de DQO.

Elaborar un nuevo modelo matemático que considere variables como DBO, NTK (Nitrógeno Total Kjeldahl), $\text{NH}_4\text{-N}$ (Nitrógeno Amoniacal), involucradas en el sistema de tratamiento, que permita realizar predicciones más acertadas acerca de la remoción de carga orgánica en este tipo de sistemas.

6. BIBLIOGRAFÍA

[5] Corporación autónoma regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga CDMB. Planta de tratamiento de aguas residuales PTAR Río Frío – CDMB. Bucaramanga: Manual, 2005. p. 5 – 7

[7] Empresa Pública de Alcantarillado de Santander S.A. E.S.P. Proyecto: Ampliación y modernización de la planta de tratamiento de aguas residuales Río Frío – PTAR Río Frío, Versión 2, 2006. Archivo EMPAS S.A E.S.P.

[2] Kassab G, Halalsheh M, Klapwijk A, Fayyad M y Van Lier, J.B. Sequential anaerobic-aerobic treatment for domestic wastewater – A review. *Bioresource Technology*. 2010.

[8] Montgomery D y Runger G. Probabilidad y Estadística aplicadas a la ingeniería. México: Mc Graw Hill, 1996. p. 530 – 576

[3] Mujeriego R. Riego con agua residual municipal regenerada. 1990. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.

[6] Orozco Jaramillo A. Bioingeniería de aguas residuales: Teoría y Diseño. 2005. Bogotá: Acodal, 2005. p. 11, 12, 18, 58, 216 – 220,

[4] Rivas Mijares G. Tratamiento de aguas residuales. 20 ed. Venezuela: Ediciones Vega.

[1] Sumino H, Takahashi M, Yamaguchi T, Abe K, Araki N, Yamazaki S, et al. Feasibility study of a pilot-scale sewage treatment system combining an up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) and an aerated fixed bed (AFB) reactor at ambient temperature. *Bioresource Technology*. 2009.